

## 动态冰蓄冷系统的经济最优控制策略研究

闫华光<sup>1</sup>, 石坤<sup>1</sup>, 许高杰<sup>1</sup>, 李德志<sup>1</sup>, 林仕立<sup>2</sup>, 宋文吉<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192 2. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640)



**摘要:** 介绍了动态冰蓄冷系统的制冷机组优先、融冰优先、定比例控制和优化控制几种控制策略, 通过对各个时段冷负荷融冰需求进行优先度排序, 提出动态冰蓄冷系统的经济最优控制策略并实现了计算机自动分析, 最后以某建筑为例对比不同控制策略下运行费用。经济最优控制策略可以确保空调系统满足冷负荷需求, 并有效降低其运行费用。

**关键词:** 动态冰蓄冷系统; 经济最优; 控制策略

中图分类号: TP39

文献标识码: A

### Research on Control Strategy of Dynamic Ice Storage System Based on Economic Optimization

YAN Hua-guang<sup>1</sup>, SHI Kun<sup>1</sup>, XU Gao-jie<sup>1</sup>, LI De-zhi<sup>1</sup>, LIN Shi-li<sup>2</sup>, SONG Wen-ji<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Several control strategies of ice storage system are introduced, including chiller-priority control, storage-priority control, rate control and optimal control. According to the priorities of ice storage use of 24-hour periods, an optimal control strategy is proposed to make the dynamic ice storage achieve economical operation, and software is designed for computer-aided analysis. Finally, by an example of comparison of the daily costs of different strategies, it is proved that the optimal control strategy can be sure to meet the load demands and reduce its operating cost effectively.

**Key words:** Dynamic ice storage system; economic optimization; control strategy

## 1 引言

集中式空调系统作为现代城市大型建筑不可缺少的部分, 其耗电量越来越大, 部分大中城市夏季中央空调的耗电量已占其高峰时段用电量的20%以上<sup>[1-2]</sup>, 与工业用电负荷一起造成了电力尖峰负荷, 加大了电网的峰谷负荷差, 导致白天用电紧张、而夜晚大量电力却无法消耗。采用冰蓄冷系统, 通过在夜间低谷时段蓄冷, 在白天供冷时段将冷量释放, 可以减少空调制冷机组在用电高峰期的耗能, 一方面可以有效实现电力“移峰填谷”, 另一方面由于存在峰谷电价差, 冰蓄冷系统也节约空调整体运行费用, 带来经济效益<sup>[3]</sup>。

动态冰蓄冷系统通过在动态过程中制取冰浆的方式, 解决了传统冰蓄冷技术占地空间大、制冰效率低、能耗高等缺陷, 成为冰蓄冷技术的主要发展方向<sup>[4]</sup>。动态冰蓄冷空调一般采用部分蓄冰的方

式, 也即将典型设计日冷负荷总量转移一部分, 由蓄冰装置在电力谷段进行蓄冰, 并在其它时段与制冷机组联合供冷以满足冷负荷需求<sup>[5-6]</sup>。由于动态冰蓄冷空调系统运行工况复杂, 自动化要求较高, 其经济高效运行的关键在于结合逐时冷负荷合理实现蓄冰和融冰的计算机控制。因此, 研究动态冰蓄冷系统的控制策略, 实现系统运行的经济性最优, 具有重要的现实意义。

本文以控制策略实施当日建筑物逐时冷负荷作为前提, 研究了动态冰蓄冷系统的经济最优控制策略及其计算机自动分析方法, 在满足冷负荷需求的基础上, 以运行费用最低作为控制目标对制冷机组和蓄冰装置冷量协调控制策略进行优化, 对比优化前后某建筑日运行费用, 验证该控制策略可以提高动态冰蓄冷系统运行的经济性。

收稿日期: 2014-04-16; 修回日期: 2015-02-02

基金项目: 973 计划(2012CB724400)

作者简介: 闫华光(1977-), 男, 湖北当阳人, 高级工程师, 主要从事功率理论及电能计量等方面的科研工作; 林仕立(1983-), 男, 广东汕头人, 助理研究员, 主要从事大规模储能技术等发面的科研工作。

## 2 冰蓄冷空调的运行控制策略

采用部分蓄冰方式的冰蓄冷空调系统，控制要解决冷负荷在制冷机组和蓄冰装置之间协调分配问题。常见控制策略有制冷机组优先控制、融冰优先控制、定比例控制、优化控制4种方式<sup>[7-8]</sup>。

### 2.1 制冷机组优先控制

制冷机组优先的控制策略是尽可能依靠制冷机组承担冷负荷，如果冷负荷小于机组的总制冷能力，则冷量完全由制冷机组提供，蓄冰装置不进行供冷；只有当冷负荷超过机组的总制冷功率时，才在制冷机组满负荷运行情况下，通过蓄冰装置融冰承担不足的部分。制冷机组优先控制的控制策略示意图，如图1所示。

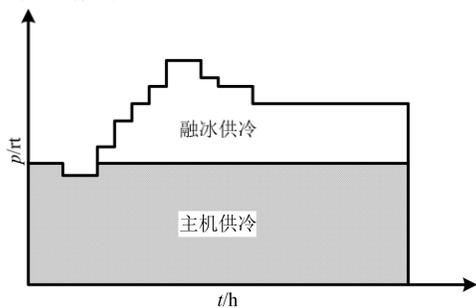


图1 制冷机组优先控制策略  
Fig. 1 Strategy of chiller-priority control

该方式在工程上易于实现且运行可靠，但在冷负荷较小情况，蓄冰装置使用率较低，不能充分发挥冰蓄冷系统夜间蓄冰优势，运行费用较高。

### 2.2 融冰优先控制

融冰优先的控制策略是尽量通过蓄冰装置融冰来负担冷负荷。当蓄冰装置不能完全负担或者冷量全部放完时，才开启制冷机组进行放冷以承担不足部分，这种控制策略理论上可以最大限度地利用蓄冰装置的蓄冷能力，实现经济效益最大化，但是容易造成蓄冰装置冷量过早耗尽，出现后期制冷机组单独供冷时无法满足冷负荷要求情况，使整个空调系统不能正常运行，因此在实际工程中很少采用。其控制方式，如图2所示。

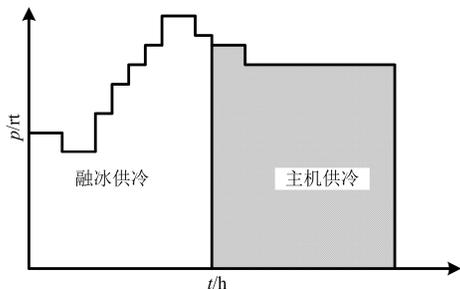


图2 融冰优先控制策略  
Fig. 2 Strategy of storage-priority control

### 2.3 定比例控制

定比例控制策略是让制冷机组和蓄冰装置在供冷时段分别承担一定比例的冷负荷，更一般的是蓄冰装置以恒定速率融冰，不足的冷量由制冷机组提供，该种控制策略的示意图，如图3所示。

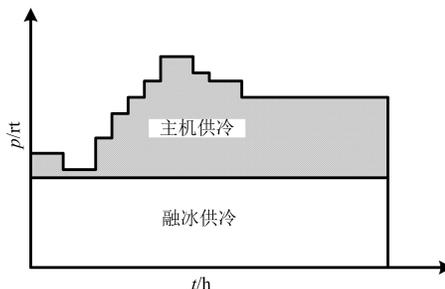


图3 定比例控制策略  
Fig. 3 Strategy of rate control

定比例控制策略可以避免供冷后期不能满足冷负荷需求情况的发生，运行费用处于制冷机组优先和融冰优先之间。

但是该策略无法根据负荷波动进行调整，造成制冷机组随着负荷不断变化，制冷效率较低，且制冷主机的频繁启停也导致其寿命的下降。同时，由于每天的逐时冷负荷并不完全相同，恒定比例的供冷方式也有可能导致蓄冰过早耗尽或者残留余冰。

### 2.4 优化控制

优化控制策略的目的在于实现冰蓄冷空调系统经济高效地运行。采用优化控制策略，在对控制日逐时冷负荷进行预测的基础上，根据预测的冷负荷分布控制制冷机组和蓄冰装置在各个时段的冷负荷分配。优化控制策略可以充分利用蓄冰装置的冷量，减少电力高峰时段的用电，同时可以提高制冷机组的运行效率，是冰蓄冷空调系统一种理想的控制策略。

目前，针对动态冰蓄冷系统的优化控制策略存在控制方法复杂、控制变量无法定量描述等问题，同时由于没有计算机辅助分析手段，采用人工配平控制策略表的方法无法针对每日冷负荷进行合理的分配方式设计，难以有效实现自动化控制。动态冰蓄冷空调系统的优化控制策略及其计算机自动分析方法有待研究。

## 3 经济最优控制策略

经济最优化的目标是在满足负荷需求的条件下，使系统的运行费用最低。

动态冰蓄冷系统包含空调工况和蓄冰工况，其运行费用可认为是下式中2种工况下消耗电费的总和：

$$\begin{cases} P_A = \sum_{k=0}^{23} \phi(k) * \min[Q_k, Q_A] / cop_A \\ P_I = \phi_{low} * \sum_{k=0}^{23} (Q_k - Q_A) / cop_I \end{cases} \quad (1) \quad \begin{cases} 0 \leq Q_{rk} \leq Q_{rk, max} \\ 0 \leq Q_{ik} \leq Q_{ik, max} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $P_A$ 、 $P_I$  分别为空调工况和蓄冰工况的运行费用;  $\phi(k)$  为分时电价,  $\phi_{low}$  为低谷时段电价;  $Q_k$  为逐时冷负荷,  $Q_A$  为空调制冷量,  $cop_A$ 、 $cop_I$  为空调机组制冷和制冰的能效比。

根据公式 1 有  $\phi_{low} \leq \phi(k)$ , 可知冰蓄冷系统运行费用的减少主要来自于蓄冰装置蓄冷和放冷时段之间的峰谷电价差。因此, 实现系统控制策略的优化, 其实质就在于根据提前预测得到的控制日逐时冷负荷, 将蓄冰装置的总蓄冷量合理分配到各个供冷时段, 使得全天的用电费用最小:

$$P_{day} = \min(P_A + P_I) \quad (2)$$

控制策略的关键在于结合分时电价, 对各个时段冷负荷的融冰需求进行优先度排序, 使得蓄冷量优先用于融冰需求度更高的时段。由于影响控制策略的因素较多, 本文仅考虑控制策略实施当日逐时冷负荷已经提前预测的情况, 以制冷主机功率及台数、蓄冷装置蓄能及释能速率作为调节参数, 选取以下 5 条限制条件作为重要影响因子<sup>[9-10]</sup>, 并对其融冰需求的优先度进行排序:

- ①防止蓄冰装置冷量过早耗尽, 以至于出现后期供冷不足现象。
- ②防止蓄冰装置有过多的残留余冰, 造成冰蓄冷系统使用效率降低。
- ③尽可能将蓄冰使用在电力高价段。
- ④尽量保证制冷机组工作在满负荷或者接近满负荷状态。
- ⑤保持制冷机组工作的连续性, 避免制冷机组频繁启制动。

按照负荷要求、电价结构、系统性能将以上评价性限制条件归为 3 类, 其中, 条件①为使系统正常运行的一类条件, 优先级别最高; 条件②、③为提高冰蓄冷系统经济指标的 2 类条件, 优先级别次之; 条件④、⑤为使制冷机组高效运行的 3 类条件, 优先级别置于最后。

控制策略根据以上 3 类条件, 将总蓄冷量按照融冰优先顺序逐级分配, 直至蓄冰完全释放或者无需继续融冰为止。

### 3.1 负荷划分处理一类条件

在任意时段内, 制冷机组的制冷量  $Q_{rk}$  和蓄冰装置融冰量  $Q_{ik}$  的总和等于该时段的冷负荷需求  $Q_k$ , 也即  $Q_{rk} + Q_{ik} = Q_k$ , 同时  $Q_{rk}$ 、 $Q_{ik}$  的可行解满足式子 3 所示各自最大放冷功率的范围。

最大制冷功率  $Q_{rk, max}$  为所有主机的功率总和, 可以视为制冷系统可承担负荷需求的保证, 当部分时段冷负荷大于该最大制冷功率时, 则冷负荷必须通过制冷机组和融冰联合供冷来实现。通过对负荷进行划分, 控制策略优先考虑冷负荷需求大于  $Q_{rk, max}$  时段, 蓄冰装置冷量首先满足这些时段内制冷机组无法提供的冷负荷。

因此, 以制冷机组最大制冷功率作为分界线, 超过分界线的冷量全部由蓄冰装置融冰提供, 而分界线以下部分则通过 2 类、3 类条件进行分配判断, 如图 4 所示。

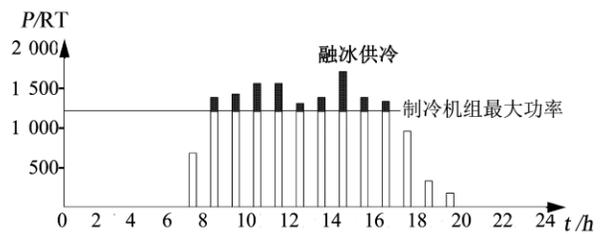


图 4 负荷划分示意图  
Fig. 4 Load divided diagram

### 3.2 剩余蓄冰量的经济性分配

上述负荷划分保证蓄冷空调可以满足全部的负荷需求, 除去这部分用于实现系统正常运行的蓄冷量, 蓄冰装置中的剩余蓄冷量  $Q_{lk}$  则以运行费用最小化, 按照 2 类条件所列标准控制分配方式。

为了使得冰蓄冷空调系统的运行费用最低, 需要提高蓄冰装置使用效率并尽可能将蓄冷量用于电价高的时段。因此, 当负荷总量超过蓄冰装置总蓄冷量时, 利用低价电的经济优势, 控制制冰机组在低谷电价段将蓄冰装置全部蓄满, 最大限度地代替高电价段的制冷耗电量。

同时, 以剩余蓄冷量  $Q_{lk}$  及放冷功率作为控制变量, 按照尖峰时段、高峰时段、平峰时段的顺序将  $Q_{lk}$  释放至各个供冷时段, 直至剩余蓄冷量  $Q_{lk}$  为 0。剩余蓄冷量  $Q_{lk}$  可通过公式 4 计算得到:

$$Q_{lk} = Q_{l(k+1)} - Q_{lk} \quad (4)$$

在尖峰、高峰电价段内, 由于电价所导致的运行费用不同, 剩余蓄冰量的分配方式也存在差异。由于尖峰时段的电价较高, 而且随着尖峰时段节电的电价补贴政策的实施, 在该时段内应该尽量减少制冷机组的耗电量, 因此控制蓄冰装置以最大释能速率放冷, 不足部分再由制冷机组提供。而在高峰

时段, 考虑到保留部分蓄冷量用于低负荷时段的需求, 首先将所有制冷主机满负荷运行的制冷功率进行组合并排序, 得到开启不同制冷主机及台数的总功率组合列表, 如图5所示。

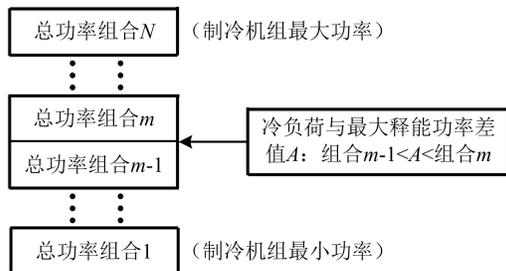


图5 高峰时段制冷主机开启方式选择  
Fig. 5 Selection mode of chiller open at peak periods

根据冷负荷与蓄冰装置最大释能功率的差值, 选取列表中大于该差值的最小功率组合, 即得到所需开启的制冷主机; 以选取的若干台制冷主机满负荷运行, 其余冷负荷由蓄冰装置提供。

在负荷分配过程中, 控制策略根据公式4, 以 $Q_{lk}$ 作为状态参数进行反馈比较, 当 $Q_{lk}$ 仍大于0时, 按照上述方式进行释冷直至所有尖峰时段和高峰时段全部分配完成。

### 3.3 平峰时段蓄冷量的分配控制

一般而言, 制冷机组越接近于满负荷运行, 其运行效率越高, 在相同制冷量的同时其耗电较小。平峰时段内, 减少冰蓄冷空调系统运行费用主要就在于提高制冷机组的运行效率。根据3类条件提出的系统性能要求, 将平峰时段冷负荷按照由小到大的顺序进行排序, 负荷值越小, 采用融冰供冷优先度越高; 反之则采用制冷机组供冷可能性更高。通过该控制方式可以将预留的剩余蓄冷量用于冷负荷较小的平峰时段, 避免了制冷主机低效率运行。

同时, 为了防止平峰时段负荷值较高的时段内, 由于蓄冰装置冷量用尽而导致制冷机组不得不低效率运行的情况发生, 当平峰时段出现负荷需求高于图5所示的总功率表某一数值时, 蓄冷量优先满足超过该功率数值部分的冷负荷需求, 其余则由制冷机组满负荷运行提供。

### 3.4 冷量平移优化方式

完成所有时段冷负荷的分配后, 若 $Q_{lk}$ 仍大于零, 按照高峰时段、平峰时段顺序以及时间先后顺序不断通过蓄冰量代替由制冷机组提供冷量, 直至蓄冰装置冷量全部释放完为止。由于电价结构为分段不同形式, 完成蓄冷量分配之后, 在电价优先的原则上, 可以采用冷量平移的方式调整负荷较高时段的负荷, 从而减少制冷主机频繁启停。

根据以上算法, 得到基于经济最优的动态冰蓄冷系统运行控制策略的流程图, 如图6所示。

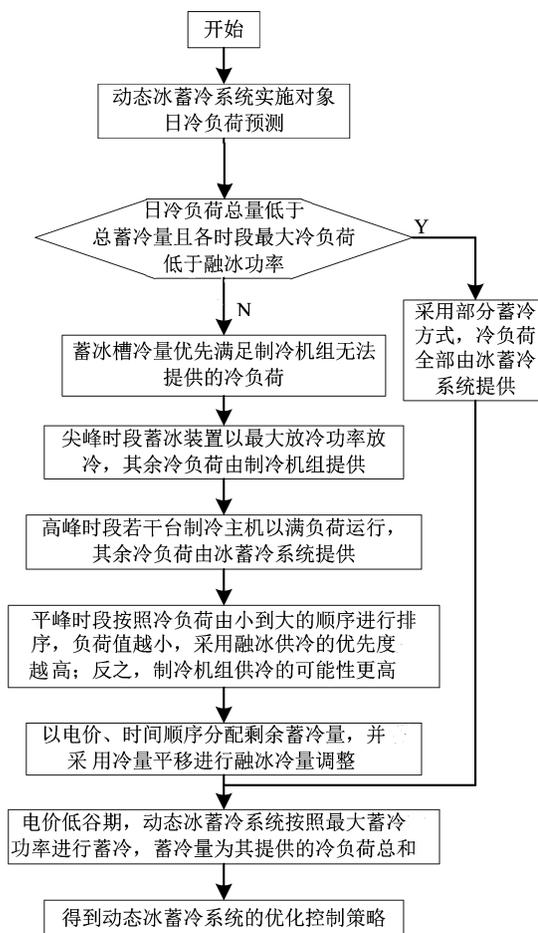


图6 控制策略流程图  
Fig. 6 Flow chart of control strategy

## 4 案例分析

### 4.1 计算机辅助分析软件

根据动态冰蓄冷系统经济最优控制策略流程, 采用VB编制了计算机辅助分析软件, 可以实现冷负荷分配控制算法的计算机自动分析, 参数设置主界面, 如图7所示。

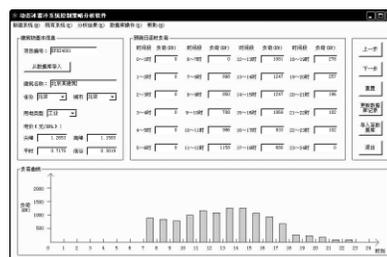


图7 软件参数设置主界面  
Fig. 7 Main interface of parameter settings

根据软件使用向导, 只需要在相应界面输入控制实施日的逐时冷负荷、建筑物所处地区的电价及

电价段、以及冰蓄冷系统制冷机组的功率及蓄能装置的蓄能释能功率，软件将自动调用算法并分析得到控制策略实施日的控制策略，同时计算出当天的运行费用，如图 8 所示。

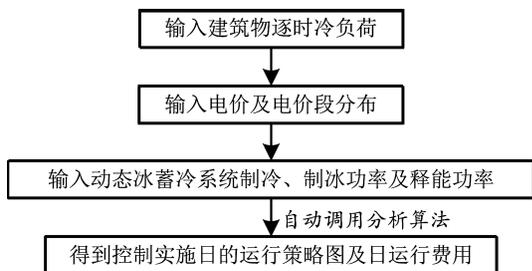


图 8 计算机自动分析软件流程  
Fig. 8 Wizards of computer-aided analysis software

### 4.2 实际案例分析

以北京某建筑为例，通过编制的软件对融冰优先控制和提出的经济最优控制 2 种控制策略分析对

比。北京电网峰谷电价以及对应时段，见表 1。

表 1 北京电网峰谷分时电价表  
Tab.1 Power prices of Beijing Grid

时段	时间范围	电价/元
尖峰段	11:00-13:00 20:00-21:00	1.265 3
高峰段	10:00-11:00 13:00-15:00 18:00-20:00	1.158 3
平峰段	7:00-10:00 15:00-18:00 21:00-23:00	0.717 5
低谷段	23:00-7:00	0.301 9

该建筑蓄冰装置总蓄冷量为 6 960 RTH，2 台制冷机组空调工况制冷量均为 586 RT，蓄冰工况制冷量均为 435 RT，蓄能速率与释能速率比为 1:2。其预测日逐时冷负荷分布，如图 9 所示。该建筑的冰蓄冷空调系统原先采用融冰优先方式，蓄冰装置冷量全部释放完才开启制冷机组供冷，其控制策略图，如图 10 所示。

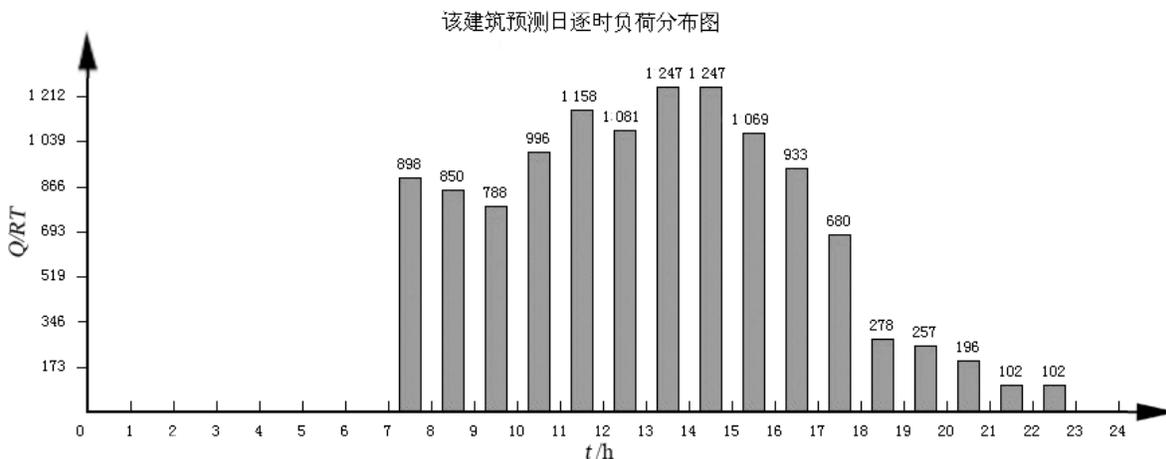


图 9 预测日逐时负荷分布图  
Fig. 9 Distribution chart of hourly cooling load

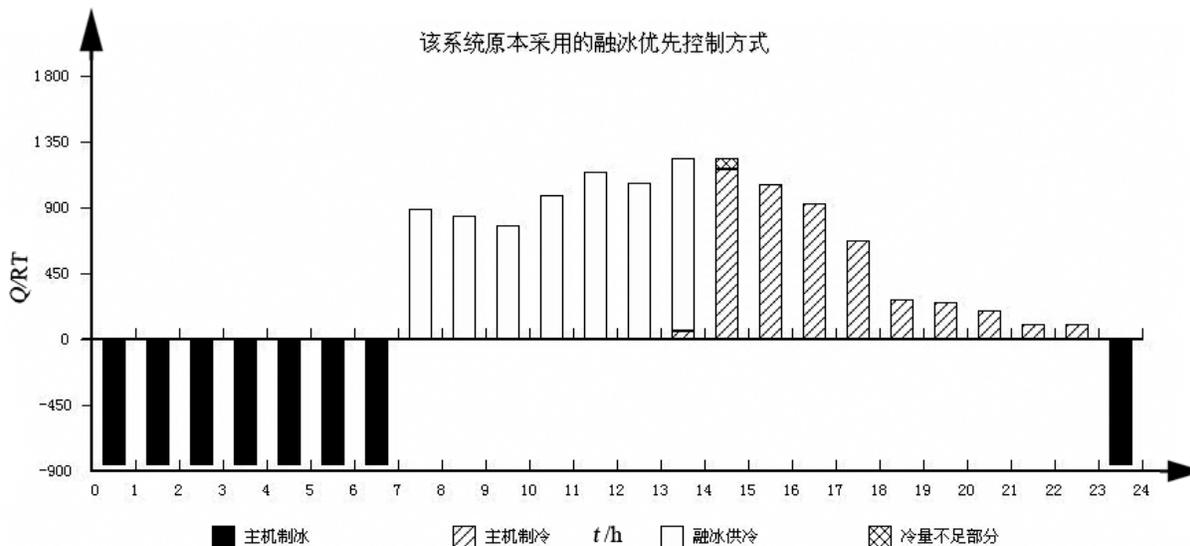


图 10 融冰优先控制策略  
Fig. 10 Operation of storage-priority control strategy

可以看出，在融冰优先的控制方式下，制冷机组在尖峰、高峰时段承担的冷负荷大，日运行费用约为 1 990 元，运行费用较高；同时，由于蓄冰槽以最大释能速率释放冷量，导致蓄冷量过早耗尽，出现预测日后期部分时段(14:00~15:00)无法满足冷负荷需求情况。该控制策略避免了后期冷负荷无法

得到满足的情况，并且蓄冰装置冷量大部分使用在电价高的时段及冷负荷需求较小时段，有效减小了制冷机组的运行费用并提高了运行效率，预测日全天的空调机组用电费用约为 1 480 元，运行费用减少 35 %左右。基于经济最优的动态冰蓄冷系统运行控制策略图，如图 11 所示。

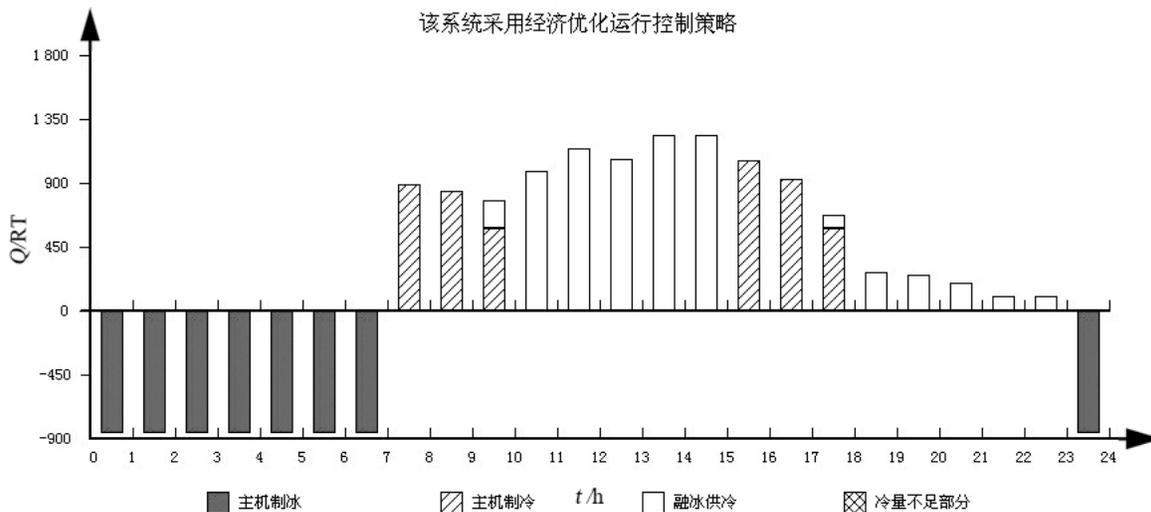


图 11 动态冰蓄冷系统经济最优控制策略  
Fig. 11 Operation of economically optimal control strategy

### 5 结 论

对于已经建成的动态冰蓄冷空调系统，控制策略是系统能够正常工作和经济运行的重要保证。本文以系统运行的经济性作为目标，提出动态冰蓄冷系统经济最优控制策略，并开发了计算机软件实现控制策略的自动分析。通过软件对比得出经济优化控制策略的控制效果合理可行，可以减少动态冰蓄冷空调系统的运行费用，具有良好的经济性。同时，经济优化控制算法在工程上易于实现，具有一定的实用价值。

### 参考文献(References)

[1] 解荔珍. 冰蓄冷空调系统用于商场的技术经济性研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(6): 42-44.  
Xie L Z. Technical and Economic Study of Ice Storage Air Conditioning System Applied to Malls[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2010, 40(6): 42-44.

[2] 董兴杰, 谷波, 叶水泉, 等. 地源热泵与冰蓄冷耦合系统的运行模拟[J]. 暖通空调, 2010, 40(6): 45-48.  
Dong X J, Gu B, Ye S Q, et al. Operation Simulation of Ground-source Heat Pump Combined with Ice Thermal Storage System[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2010, 40(6):45-48.

[3] 樊瑛, 龙惟定. 冰蓄冷系统的碳减排分析[J]. 同济大学学报, 2011, 39(1): 105-108.  
Fan Y, Long W D. Carbon Dioxide Emissions Reduction Analysis of Ice Storage System[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),

2011, 39(1): 105-108.

[4] 冯自平. 建筑节能新技术—动态冰蓄冷[J]. 建筑节能, 2009, 3: 38-40.  
Feng Z P. New Technology of Building Energy Conservation - Dynamic Ice Storage System[J]. Construction and Architecture, 2009, 3: 38-40.

[5] 袁圆, 林波荣, 朱颖心. 基于负荷动态模拟的冰蓄冷系统及控制优化运行[J]. 暖通空调, 2006, 36(10): 75-78.  
Yuan Y, Lin B R, Zhu Y X. Ice Storage System Design and Control Optimization Based on Hourly Dynamic Load Simulation[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2006, 36(10): 75-78.

[6] 马宏权, 龙惟定. 区域供冷系统的应用现状与展望[J]. 暖通空调, 2009, 39(10): 52-58.  
Ma H Q, Long W D. Present Status and Prospects of District Cooling System[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2009, 39(10): 52-58.

[7] Carey C.W, Mitchell J.W, Beckman W.A. The Control of Ice Storage Systems[J]. ASHRAE Journal, 1995, 37(5): 32-39.

[8] 廖勇. 基于负荷预测的冰蓄冷空调系统优化控制研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2008.  
Liao Y. Optimal Control ResearCh Based on Cooling Load Prediction in Ice Storage Air-conditioning System[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2008.

[9] 李秀娟, 纪赖恩, 许晓东. 基于粗糙集理论的中央空调节能评测的研究[J]. 控制工程, 2010, 17(3): 286-289.  
Li X J, Ji L E, Xu X D. Rough Set Theory Based Evaluation Method of Energy-saving for Central Air-conditioning System [J]. Control Engineering of China, 2010, 17(3): 286-289.

[10] 何大四, 张旭. 蓄冷系统新型节能优化运行控制方法[J]. 建筑科学, 2007,23(2):27-30.  
He D S, Zhang X. A New Optimal Energy Efficiency Control Method of Ice Storage System[J]. Building Science, 2007, 23(2): 27-30.